

УДК 621.307

АНАЛІЗ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

докт. техн. наук, проф. Осадчук В.С., канд. техн. наук Осадчук О.В.

Напівпровідникові прилади з від'ємним опором знайшли широке застосування в різноманітних перемикаючих, порогових, підсилювальних пристроях [1 – 5]. Проте, в останній час вони знаходять застосування як частотні сенсори газу, магнітного поля, тиску, вологості, тощо [6 – 8]. В цих вимірювальних перетворювачах основним елементом, який впливає на чутливість, точність, надійність роботи є генератор електричних коливань, в якому за рахунок від'ємного опору компенсується втрати енергії в коливальному контурі. Поява нових транзисторних структур з від'ємним опором і застосування їх як вимірювальних перетворювачів потребує подальшого аналізу роботи генератора. Його схема показана на рис.1. Вона складається із біполярного і польового транзисторів у вигляді гібридної інтегральної схеми. Коливальний контур утворений зовнішньою індуктивністю і внутрішньою ємністю транзисторів, яка існує на електродах колектор-затвор і стік-затвор біполярного і польового транзисторів. Одним із перших досліджень, присвячених вирішенню нелінійного рівняння коливань, була робота Ван дер Поля [9]. В цій роботі були об'єднані рівняння паралельного коливального контуру і нелінійної вольт-амперної характеристики з від'ємним опором, що дало змогу отримати нелінійне диференціальне рівняння другого порядку. Воно легко вирішується чисельним методом при застосуванні найсучасніших персональних комп'ютерів. Проте на практиці потрібно мати аналітичні вирази для амплітуди коливань, чутливості амплітуди і частоти до змін зовнішніх елементів схеми, режимів живлення, тому застосовуються квазілінійні методи аналізу. В цьому випадку характеристика від'ємного опору може апроксимуватись як ламаною лінією, так і багаточленом різних порядків. При цьому рішення не потребує складних математичних засобів, отримується відносно легко і дає відповідь на поставленні запитання [9].

Апроксимація вольт-амперної характеристики.

Фізичні процеси, які протікають в транзисторній структурі (рис.1), є досить складними, що не дає можливості описати їх простими коректними кількісними залежностями. Тому аналітичний опис статичної вольт-амперної характеристики базується на її апроксимації елементарними функціями. Найбільш доцільною є абстрактна апроксимація, яка не пов'язана з фізичними процесами в транзисторній структурі, а спирається, в першу чергу, на її екстремальні точки і математичні особливості їх околу. На рис.2 подана статична вольт-амперна характеристика транзисторної структури (рис.1) з від'ємним опором.

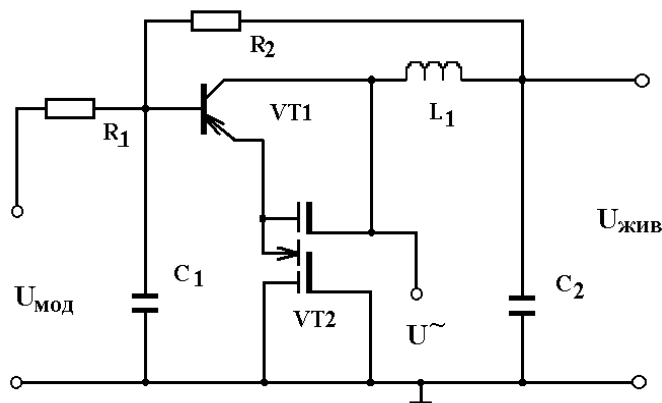


Рис.1. Принципова схема генератора.

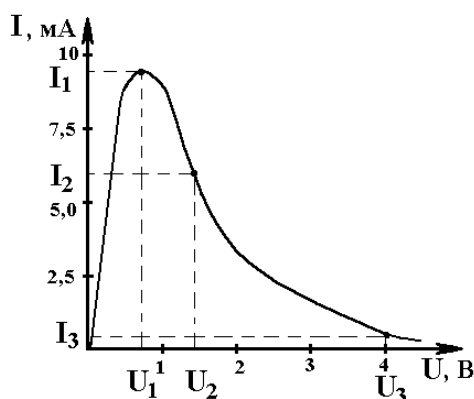


Рис.2. Вольт-амперна характеристика транзисторної структури з від'ємним опором.

Досить широке розповсюдження знайшла кусково-лінійна апроксимація статичної вольт-амперної характеристики напівпровідникових структур з від'ємним опором за допомогою трьох-чотирьох відрізків [10, 11]. Вона дозволяє досліджувати досить складні транзисторні схеми добре розвинутими лінійними методами. З підвищенням кількості лінійних відрізків можна покращити апроксимацію вольт-амперної характеристики, але при цьому збільшується кількість складних розрахункових операцій.

В точці максимуму (U_1, I_1) і достатньо малому її околу аналітичний вираз статичної характеристики можна представити у вигляді поліному [2]

$$I(U) = I_1 + a_1(U - U_1) + a_2(U - U_1)^2 + a_3(U - U_1)^3 + \dots, \quad (1)$$

де $a_1=0$ внаслідок необхідної умови максимуму $(dI/dU)|_{U=U_1}=0$, що викликає неточність лінійного опису піка характеристики. Найбільш простішою нелінійною апроксимацією піка є параболічна апроксимація

$$I(U) = I_1 + a_2(U - U_1)^2, \quad (2)$$

яка витікає з рівняння (1). Гілки параболи (1), які мають загальну вершину в точці (U_1, I_1) , є несиметричними. Ліва гілка більш крута і описується виразом

$$I = I_1 \left(1 - \left(1 - \frac{U}{U_1} \right)^2 \right), \quad (3)$$

який апроксимує ділянку характеристики структури для напруг $U \leq U_1$. Більш полого права гілка параболи проходить через точку перегину (U_2, I_2) і описується рівнянням в діапазоні напруг $U_1 \leq U \leq U_2$:

$$I = I_1 - (I_1 - I_2) \left(\frac{U - U_1}{U_2 - U_1} \right)^2. \quad (4)$$

Квадратична функція не досить чітко описує пологий мінімум характеристики структури, тому використовують кусково-степеневу апроксимацію [2]

$$I = I_3 + (I_2 - I_3) \left(\frac{U_3 - U}{U_3 - U_2} \right)^n \quad \text{при } U_2 \leq U \leq U_3, \quad (5)$$

де $n=2-4$. Змінюючи коефіцієнт n в цих межах, можна досить точно описати вольт-амперну характеристику транзисторної структури. В залежності від конкретних умов застосування її можна використати більш спрощений варіант апроксимації спадаючої ділянки вольт-амперної характеристики [2]

$$I = I_3 + (I_1 - I_3) \left(\frac{U_3 - U}{U_3 - U_1} \right)^n \quad \text{при } U_1 \leq U \leq U_3 . \quad (6)$$

Квазілінійна модель генератора

Схема генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором по змінному струму в загальному вигляді подана на рис.3. На схемі сумарна індуктивність $L = L_o + L_1$ і опір $R = r_o + R_1$, де L_o і r_o – індуктивність і опір зовнішнього кола, L_1 і R_1 – індуктивність і опір виводів транзисторної структури. Розвиток процесів в цій схемі пов'язаний із зміною струму i_T і напруги U :

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_{жув} - i_T R - U}{L} , \quad (7)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{i_T - I(U)}{C(U)} . \quad (8)$$

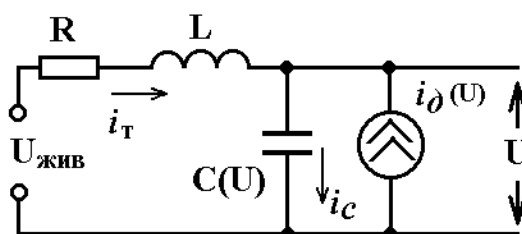


Рис.3.Схема генератора по змінному струму.

Рівняння (7) і (8) можна об'єднати шляхом ділення першого на друге, тобто:

$$\frac{di_T}{du} = \frac{U_{жув} - i_T R - U}{i_T - I(U)} \cdot \frac{C(U)}{L} . \quad (9)$$

В стані рівноваги (U_o, i_{To}) струми і напруги схеми не змінюються, тому

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{i_T=i_{To}} = 0 , \quad \left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_o} = 0 . \quad (10)$$

Використовуючи умову (10), з рівнянь (7) і (8), знаходимо:

$$U_{жув} - i_{To} R - U_o = 0 , \quad (11)$$

$$i_{To} - I(U_o) = 0 . \quad (12)$$

Стан схеми згідно (11) і (12) реалізується в точках перетину статичної вольт-амперної характеристики і лінії статичного навантаження схеми:

$$I(U_o) = (U_{жув} - U_o) / R , \quad (13)$$

який є станом рівноваги досліджуваної схеми. Введемо нові зміни в рівняннях (7) і (8), які мають вигляд:

$$u = U - U_o , \quad (14)$$

$$i = i_T - i_{To} . \quad (15)$$

Нелінійну статичну вольт-амперну характеристику транзисторної структури поблизу стану рівноваги замінимо лінійною функцією

$$I(U_o + u) = I(U_o) + u / R_o , \quad (16)$$

де R_o – диференційний опір в точці рівноваги.

Нелінійну ємність транзисторної структури $C(U)$ на електродах колектор - перший затвор і стік – другий затвор поблизу стану рівноваги вважаємо постійною величиною $C(U_o)$,

яка не залежить від напруги. Враховуючи ці зауваження, рівняння (7) і (8) перетворюються в лінійні з постійними коефіцієнтами:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L}, \quad (17)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{u}{R_0 C}. \quad (18)$$

Для визначення характеристичного рівняння на основі (17) і (18), необхідно провести диференціювання напруги по часу рівняння (18):

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \frac{di}{dt} \cdot \frac{1}{C} - \frac{du}{dt} \cdot \frac{1}{R_0 C}. \quad (19)$$

Підставимо в (19) замість $\frac{di}{dt}$ його значення, яке визначається виразом (17), тобто:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \left(-\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L} \right) \cdot \frac{1}{C} - \frac{du}{dt} \cdot \frac{1}{R_0 C}. \quad (20)$$

З другого боку, згідно електричної схеми генератора (рис.3), можна записати

$$i = i_c + i_\partial, \quad (21)$$

де $i_\partial = u/R_0$. При підстановці (21) в (20), отримаємо наступне рівняння:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{du}{dt} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_0 C} \right) + \frac{u}{LC} \left(\frac{R}{R_0} + 1 \right) = 0. \quad (22)$$

Виходячи з (22), характеристичне рівняння системи має вигляд:

$$x^2 + x \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_0 C} \right) + \frac{1}{LC} \left(\frac{R}{R_0} + 1 \right) = 0. \quad (23)$$

Корені характеристичного рівняння визначається з (23):

$$x_{1,2} = \frac{-\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_0 C} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{R_0 C} \right)^2 - 4 \frac{1}{LC} \left(\frac{R}{R_0} + 1 \right)}}{2}. \quad (24)$$

Згідно теорії стійкості Ляпунова, корені характеристичного рівняння (24) визначають стан рівноваги системи. Якщо x_1 і x_2 мають дійсні значення, то при $x_{1,2} < 0$ будь-яке початкове відхилення в системі буде згасати по експоненціальному закону, а при $x_{1,2} > 0$ - наростати.

Якщо $x_{1,2} = a + jb$ (комплексні величини), то в системі можливі синусоїдальні коливання, причому при $a > 0$ коливання наростають, а при $a < 0$ - згасають. Комплексні корені при позитивних значеннях R_0/R містяться в середині області.

$$\frac{R}{R_0} > \frac{1}{4} \left(\sqrt{\frac{L}{RR_0 C}} - \sqrt{\frac{RR_0 C}{L}} \right)^2. \quad (25)$$

При $R_0/R < -1$ межа комплексних коренів визначається функцією

$$\frac{R}{R_0} < -\frac{1}{4} \left(\sqrt{\left| \frac{L}{RR_0 C} \right|} + \sqrt{\left| \frac{RR_0 C}{L} \right|} \right)^2. \quad (26)$$

Таким чином, стан рівноваги на спадаючій ділянці вольт-амперної характеристики буде стійким при виконанні умов:

$$R < |R_{\partial}|, \quad L \leq R|R_{\partial}|C. \quad (27)$$

Величини R_{∂} , R і C визначаються на основі повного опору Z на електродах колектор-затвор 1 біполярного і польового транзисторів і затвор 2 – сток польового транзистора. Синусоїдальні коливання в генераторі виникають при виконанні умови (27), яка перетворюється в наступний вигляд:

$$\text{Im}Z = 0, \quad \text{Re}Z < 0. \quad (28)$$

Повний опір Z , активна частина якого має негативне значення, а реактивна – ємнісний характер, визначається з еквівалентної схеми пристрою, яка подана на рис.4. Згідно вибраних напрямів контурних струмів система рівнянь Кірхгофа має вигляд:

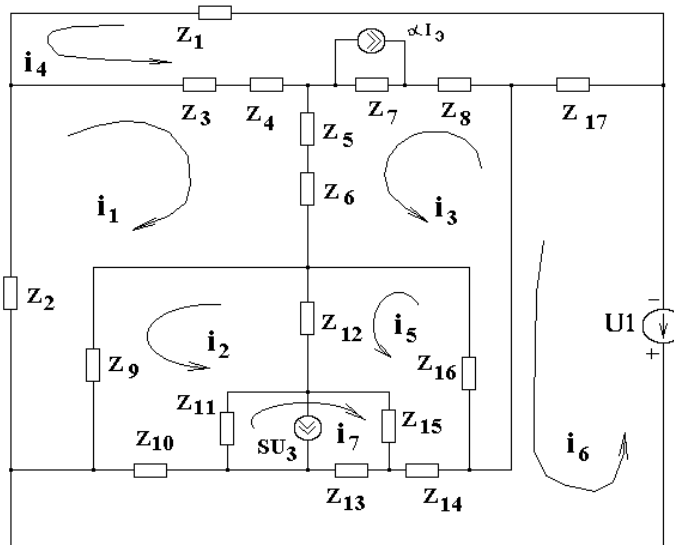


Рис.4.Еквівалентна схема генератора.

$$\begin{aligned} 0 &= (Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_9 + Z_2)i_1 - (Z_3 + Z_4)i_4 + Z_9i_2 + (Z_5 + Z_6)i_3; \\ 0 &= (Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})i_2 + Z_{11}i_7 - Z_{12}i_5 + Z_{15}S_1Z_{11}i_5 + Z_9i_1 + Z_{10}i_6; \\ 0 &= (Z_5 + Z_6 - Z_{16} + Z_8 + Z_7)i_3 + (Z_6 + Z_5)i_1 - Z_{16}i_5 - Z_8i_4 - Z_7i_4 + Z_7\alpha i_1; \\ 0 &= (Z_3 + Z_4 + Z_7 + Z_8 + Z_{17} + Z_1)i_4 + (Z_3 + Z_4)i_1 - (Z_7 + Z_8)i_3 - Z_{17}i_6 - Z_7\alpha i_1; \quad (29) \\ 0 &= (Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{12})i_5 - Z_{12}i_2 + Z_{15}i_7 - Z_{14}i_6 - Z_{16}i_3; \\ U_1 &= (Z_{17} + Z_{14} + Z_{13} + Z_{10})i_6 - Z_{17}i_4 - Z_{14}i_5 + Z_{13}i_7 - Z_{10}i_2; \\ 0 &= (Z_{11} + Z_{13} + Z_{15})i_7 + Z_{11}i_2 + Z_{15}S_1Z_{11}i_5 + Z_{13}i_6 + Z_{15}i_5; \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1; \quad Z_2 = -j/(\omega C_1); \quad Z_3 = R'_b + j\omega L_b; \quad Z_4 = R_b; \\ Z_5 &= \frac{R_E}{1 + \omega^2 R_E^2 C_E^2} - \frac{j R_E^2 \omega C_E}{1 + \omega^2 R_E^2 C_E^2}; \quad Z_6 = R'_E + j\omega L_E; \\ Z_7 &= \frac{R_K}{1 + \omega^2 R_K^2 C_K^2} - \frac{j R_K^2 \omega C_K}{1 + \omega^2 R_K^2 C_K^2}; \quad Z_8 = R'_K + j\omega L_K; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_9 &= -j/(\omega C_{KOP}); & Z_{10} &= R_D' + j\omega L_D; & Z_{13} &= -j/(\omega C_{GD}); \\
Z_{11} &= \frac{R_{DS}}{1 + \omega^2 R_{DS}^2 C_{DS}^2} - \frac{j R_{DS}^2 \omega C_{DS}}{1 + \omega^2 R_{DS}^2 C_{DS}^2}; & Z_{12} &= R_S' + j\omega L_S; \\
Z_{15} &= \frac{R_{GS}}{1 + \omega^2 R_{GS}^2 C_{GS}^2} - \frac{j R_{GS}^2 \omega C_{GS}}{1 + \omega^2 R_{GS}^2 C_{GS}^2}; & Z_{14} &= R_G' + j\omega L_G; \\
Z_{17} &= j\omega L_1; & \alpha &= \frac{\alpha_o}{1 + j(f/f_0)^2}; & Z_{16} &= -j/(\omega C_{KOP}).
\end{aligned}$$

α - комплексне значення коефіцієнта передачі по струму, S_1 - крутість польового транзистора. Рішення системи рівнянь (29) виконано методом Гаусса на персональному комп'ютері типу IBM PC/AT.

Амплітуда коливань генератора визначається на основі енергетичного балансу: енергія, яка поглинається коливальним контуром генератора, повинна дорівнювати енергії яку віддає від'ємний опір.

Потужність, яку віддає від'ємний опір, визначається виразом:

$$P_{\text{від}} = U_p I = U_p^2 / R_{\text{втр}} \quad , \quad (30)$$

де U_p - напруга, при якій компенсується втрати енергії в коливальному контурі за рахунок від'ємного опору, $I = U_p / R_{\text{втр}}$ - струм в паралельному електричному колі, складеному із від'ємного опору і опору втрат $R_{\text{втр}}$. В стаціонарному режимі при синусоїдальній напрузі U вона дорівнює потужності $P_{\text{втр}}$, яку споживає коливальний контур

$$P_{\text{втр}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U^2}{R_{\text{втр}}} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_m^2 \sin^2 \omega \cdot t}{R_{\text{втр}}} dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_m^2}{R_{\text{втр}}} \quad . \quad (31)$$

Прирівнявши (30) і (31), отримаємо

$$\frac{U_m^2}{2R_{\text{втр}}} = \frac{U_p^2}{R_{\text{втр}}} \quad , \quad (32)$$

Звідки амплітуда напруги U_m генератора

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U_p \quad . \quad (33)$$

Чутливість амплітуди до зміни опору втрат визначається рівнянням [9]

$$S_{R_{\text{втр}}}^{U_m} = \frac{2R_{\text{д}}}{R_{\text{втр}}(R_{\text{д}}/R_{\text{втр}} - 1)} \quad . \quad (34)$$

Аналіз виразу (34) показує, що амплітудна чутливість генератора збільшується із зростанням паралельності прямої опору втрат і характеристики від'ємного опору. Для зменшення вищих гармонічних складових в напрузі генератора необхідна мала різниця між опором $R_{\text{д}}$ і $R_{\text{втр}}$. При синусоїдальній формі коливань генератора резонансна частота має вигляд [9]:

$$\omega_o = \left[1 - \frac{1}{4Q^2} \left(1 - \frac{R_{\text{втр}}}{R_{\text{д}}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad , \quad (35)$$

де Q - добротність коливального контуру. На основі (35) визначається чутливість частоти до зміни опору втрат [9]:

$$S_{R_{\text{втр}}}^{\omega_o} = \frac{1}{4Q^2} \left(1 - \frac{R_{\text{втр}}}{R_{\text{д}}} \right) \quad . \quad (36)$$

Частотна чутливість тим менша, чим менше відрізняються значення опорів R_d і $R_{впр}$. З другого боку величина від'ємного опору повинна бути такою, щоб забезпечувався режим самозбудження генератора, а це означає, що малу частотну чутливість має той генератор, який працює поблизу межі стійкості.

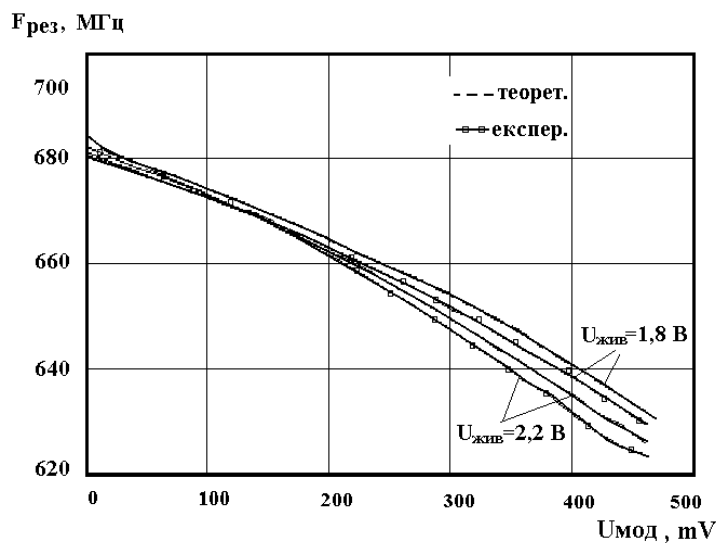


Рис.5. Теоретична і експериментальна залежність частоти генерації від напруги модуляції.

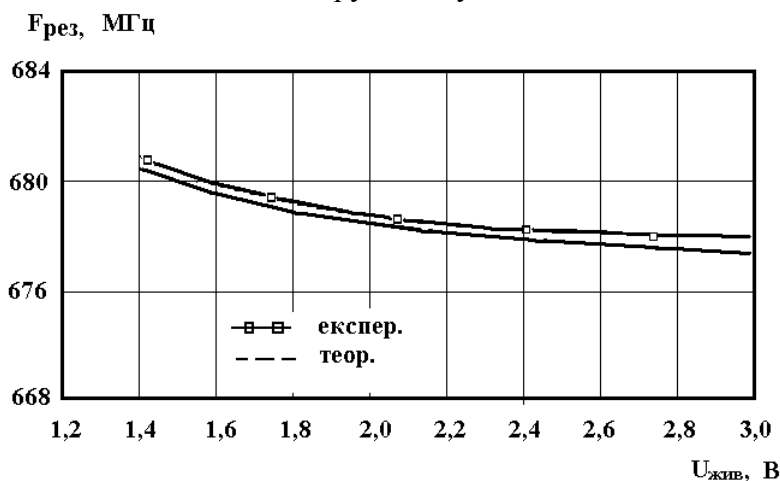


Рис.6. Залежність частоти генерації від напруги живлення.

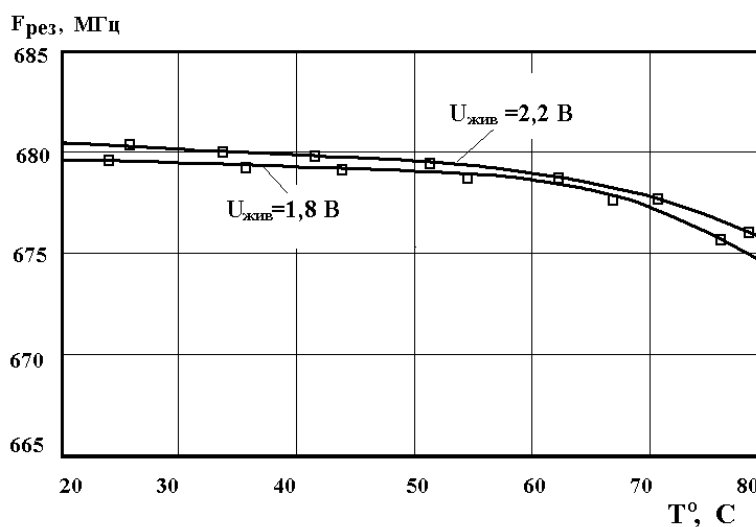


Рис.7. Експериментальна залежність частоти генерації від температури.

Зміна постійної напруги модуляції, яка подається на базу біполярного транзистора, дозволяє управляти частотою генерації (рис.5). З другого боку, частотою генерації можна управляти за рахунок зміни напруги живлення (рис.6) проте, в цьому випадку діапазон зміни частоти є невеликим і складає 0,6 %. На рис.7 подані експериментальні залежності резонансної частоти генератора при різних режимах живлення від температури навколишнього середовища. Оптимальним діапазоном робочих температур є інтервал від -60°C до 60°C . Експериментальні дослідження роботи генератора показали, що він достатньо стабільно працює при змінах зовнішніх факторів таких як температура, режими живлення. Коефіцієнт нестабільності без застосування режимів стабілізації склав 10^{-5} [12]. Таким чином, використання від'ємного опору транзисторних структур дозволяє реалізувати в широкому частотному діапазоні стабільну генерацію електричних коливань в генераторах, створених на основі простих схем.

Висновки

Застосування від'ємного опору транзисторних структур для побудови генераторів електричних коливань дозволяє використовувати останні в якості різноманітних сенсорів із стабільними параметрами у широкому діапазоні частот.

Література

1. Гаряинов С.А., Абезгауз И.Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. –М.: Энергия, 1970. –320 с.
2. Сидоров А.С. Теория и проектирование нелинейных импульсных схем на туннельных диодах. –М.: Советское радио, 1971. –261 с.
3. Ауэн А.Ф., Тараха А.В. Полупроводниковые системы с лямбда характеристикой. –М.: Знание, 1979. –64 с.
4. Осадчук В.С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах. –Киев: Выща школа, 1987. –155 с.
5. Wu C.Y. An analysis and fabrication Technology of the lambda bipolar transistor. IEEE Trans. Electron Devices. Vol. ED-27, №2, 1980. P.414-419.
6. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. –М.: Советское радио, 1975. –103 с.
7. Патент Российской Федерации № 2092933. Полупроводниковый датчик магнитного поля / Осадчук В.С., Осадчук А.В., Осадчук Е.В. / -10.10.97. Бюл. Изобр. №28.
8. Патент Российской Федерации № 2104619. Электростатический микрофон / Осадчук В.С., Осадчук А.В., Осадчук Е.В. / -10.02.98. Бюл. Изобр. № 4.
9. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах. –М.: Советское радио, 1975. –286 с.
10. Ko W.H. Designing tunnel diode oscillators. Electronics, Vol.34, №6, 1961. P.68-72.
11. Семеновский В.К. Время переключения туннельного диода при запуске наклонным фронтом напряжения. Радиотехника и электроника. Т.VII, №12, 1962. С.2092-2094.
12. Осадчук В.С., Осадчук А.В. Моделирование и экспериментальное исследование СВЧ генератора. Материалы V международной научно-технической конференции «КУСС-99», Винница, 1999. С.186-190.

Кафедра мікроелектроніки, оргтехніки та зв'язку.